

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 43 22 291 A 1

⑲ Aktenzeichen: P 43 22 291.9
⑳ Anmeldetag: 5. 7. 93
㉑ Offenlegungstag: 19. 1. 95

⑤1 Int. Cl.⁸:
G 01 L 1/24
G 01 D 5/26
H 01 S 3/106
H 01 S 3/0933
// G 01 P 15/00

DE 43 22 291 A 1

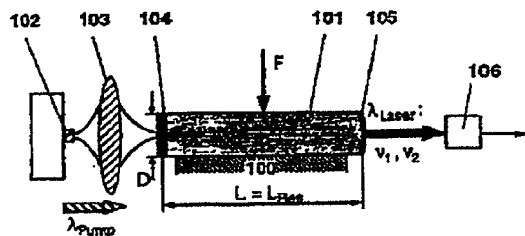
⑦1 Anmelder:
Holzapfel, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 34233 Fuldatal,
DE

⑦2 Erfinder:
Holzapfel, Wolfgang, Dr.-Ing., 34233 Fuldatal, DE;
Settgast, Walter, Dr.-Ing., 85101 Lenting, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Optische Kraftmeßeinrichtung

⑤7 Die optische Kraftmeßeinrichtung besteht aus einem kristallinen Festkörpermateriale (101), welches sowohl photoelastische als auch laseraktive Eigenschaften besitzt und das an den Enden die Resonatorspiegel (104, 105) trägt und so einen monolithischen optischen Sensor-Oszillator bildet. Mittels einer Strahlungsquelle (102) und einer Einkoppeloptik (103) wird der photoelastische Sensor-Oszillator zu Laseraktivität angeregt. Wirkt eine Kraft F in orthogonaler Richtung zur Resonatorachse auf das mit einem starren, kräfteausleitenden Gestell (100) verbundene Material ein, so ändern sich die ausgekoppelten Frequenzanteile ν_1 und ν_2 , die in ihrer Differenz ein kraftabhängiges Signal bilden. Die optische Kraftmeßeinrichtung mit frequenzanalogem Ausgangssignal und großem Meßbereich kann zur Messung der Kraft oder einer daraus abgeleiteten Meßgröße wie Beschleunigung oder Masse eingesetzt werden.



DE 43 22 291 A 1

Gattung des Anmeldungsgegenstandes

Die Erfindung betrifft eine optische Kraftmeßeinrichtung mit frequenzanalogem Ausgangssignal, die zur Messung der Kraft oder einer daraus abgeleiteten Meßgröße, wie Beschleunigung, Druck oder Masse, eingesetzt werden kann.

Angabe zur Gattung

Die Kraftmeßeinrichtung ermöglicht als eine monolithisch-optische Anordnung aus laseraktivem und photoelastischem Kristallmaterial die präzise Sensierung von Kräften. Sie weist einen frequenzanalogen Ausgang auf und nutzt die Vorteile der optischen Signalübertragung in Verbindung mit Frequenzsignalen, so daß das Meßsignal dieser Kraftmeßeinrichtung unabhängig von Intensitätsschwankungen wird, die durch die Übertragungstrecke verursacht werden können. Diese Kraftmeßeinrichtung kann auch in leicht modifizierter Ausführung zur Messung der von einer Kraft abgeleiteten physikalischen Größen (Beschleunigung, Masse) angewandt werden.

Stand der Technik

Aus der wissenschaftlichen Literatur ist bekannt, daß Laseroszillatoren mit resonatorinterner Phasenanisotropie Strahlungsanteile mit orthogonalen Polarisations Ebenen emittieren können (M. Doyle, M. B. White, Appl. Phys. Lett. (1964), 10, Seite 193—195).

Es ist aus mehreren Patenten (Patent US 3,517,560, US 3,786,681, US 3,800,594, US 4,048,859), die den resonatorinternen photoelastischen Effekt nutzen, bekannt, wie die Kraft optisch gemessen werden kann. Diesen Patenten ist allen gemeinsam, daß sie einen hybriden Aufbau beschreiben, d. h. die Nutzung eines laseraktiven Materials und eines weiteren photoelastischen Materials. Als laseraktives Material wird in diesen Patentschriften immer ein Gas (z. B. He-Ne-Gemische) angegeben, das sich in der Regel in einem durch transparente Fenster abgeschlossenen Volumen befindet. Als kraftsensierendes Element ist zusätzlich ein photoelastisches Material in dem Resonator angeordnet.

Ein weiterer Lösungsvorschlag zur Messung der Kraft oder der Beschleunigung ist in der deutschen Patentschrift DE 26 33 178 enthalten. Hier wird zusätzlich eine aktive Stabilisierung einer der orthogonal polarisierten optischen Moden im Resonator vorgeschlagen, mit der eine Unterdrückung von Störeinflüssen, wie Temperatur, Vibration usw., erreicht wird.

Es wird somit bisher davon ausgegangen, daß diese resonatorinternen photoelastischen optischen Kraftsensoren immer ein laseraktives Material und ein davon getrenntes photoelastisches Material benötigen.

Die Messung der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung mittels laseroptischer Systeme, die ein frequenzanaloges Ausgangssignal erzeugen, ist für die meßtechnische Industrie von Bedeutung und somit Gegenstand neuerer Patente und Offenlegungsschriften (US 4233 847, EP 0229 448, DE 36 19 498 A1, US 4841 774).

Von Nachteil bei den zuvor angegebenen Kraftmessern ist, daß durch den Einsatz mehrerer Bauteile (Gasentladungstrecke als laseraktives Material mit Abschlußfenstern und photoelastisches Material) in einem Resonator die Grenzflächen (Anzahl n) der Bauteile unerwünschte Subresonatoren (Anzahl: $0,5n \cdot (n+3)$) bilden, die im allgemeinen die Auflösung des Kraftsensors durch eine erhöhte Frequenzinstabilität vermindern und die Störanfälligkeit des Systems erhöhen. Weiterhin kann die Kraftmessung mit den bislang vorgeschlagenen Kraftmeßgeräten fehlerhaft sein, wenn durch eine äußere Störung die relative Lage zwischen dem Sensorelement und der Strahlachse des Resonators verändert wird. Außerdem haben die bisher vorgeschlagenen Kraftmeßeinrichtungen auf Grund ihrer modularen Bauweise und der schwachen optischen Verstärkungsfaktoren der Gasentladungstrecken große Resonatorlängen. Diese großen Abmessungen bedingen eine geringe Empfindlichkeit und nur eingeschränkte Nutzbarkeit für industrielle Anwendungen. Weiterhin werden in allen bekannten technischen Lösungen Glas- bzw. Glasfasermaterialien zur photoelastischen Kraftwandlung vorgeschlagen bzw. verwendet. Diese Materialien sind jedoch eingefrorene unterkühlte Flüssigkeiten und zeigen wegen ihrer vergleichsweise hohen Atombeweglichkeit deutliche Kriech- und Hysteresefehler bei der Kraftmessung. Bei Verwendung von Glasfasern mit plastischen Kern- bzw. Mantel Eigenschaften ist dieses ungünstige Verhalten extrem verstärkt. Diese Nachteile verhindern eine genaue Kraftmessung und sind bislang überhaupt nicht erkannt worden.

Aufgabe

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, gegenüber dem aufgezeigten Stand der Technik die Anzahl der Bauteile im Resonator des Sensor-Oszillators der Kraftmeßeinrichtung zu minimieren und somit die Anzahl der störenden resonatorinternen Grenzflächen zu verringern. Außerdem soll die Möglichkeit der Verlagerung zwischen Aufnehmerelement und Resonatorachse minimiert werden und die Baugröße verringert werden. Die Meßempfindlichkeit sollte gesteigert werden, um in Verbindung mit einer hohen Laserstabilität eine deutlich geringere untere Meßgrenze zu realisieren. Thermische Störeffekte, die z. B. bisher durch die Verwendung einer Gasentladung als optischen Verstärker bedingt sind, sollten verringert werden. Die sekundären mechanischen Kontakte, die z. B. zur Energieversorgung des Meßsystems notwendig sind, sollen minimiert werden. Kriech- und Hystereseeffekte sollen soweit wie möglich durch die richtige Wahl des photoelastischen und laseraktiven Materials vermieden werden.

Lösung

Diese Aufgabe wird durch die Meßeinrichtung, die durch die Merkmale des Anspruches 1 sowie die Unteransprüche 1 bis 5 gekennzeichnet wird, gelöst.

Beschreibung eines Ausführungsbeispiels

Die Erfindung wird anhand der Zeichnungen beispielsweise näher erläutert. Die Fig. 1 zeigt das Grundprinzip der Erfindung eines monolithischen optischen Sensor-Oszillators, die Fig. 2 zeigt eine modulare Real-

sierung, die Fig. 3 und Fig. 4 zeigen jeweils ein Ausführungsbeispiel für fasergekoppelte optische Sensor-Oszillatoren in monolithischer Technik, die Fig. 5 erläutert die Anwendung eines aktiven Stabilisierungsverfahrens, welches erforderlichenfalls eingesetzt werden kann.

Anhand des in Fig. 1 näher beschriebenen Grundprinzips wird der Erfindungsgedanke verdeutlicht. In dieser Meßeinrichtung bilden die Spiegel 104 und 105 zusammen mit dem photoelastischen laseraktiven Kristallmaterial 101 einen phasensteuerbaren Resonator. Der Spiegel 104 ist hochgradig transparent für die zur Anregung des Lasers notwendige Pumpstrahlung der Wellenlänge λ_{pump} , die z. B. von einer Laserdiode 102 erzeugt wird, und gleichzeitig hochgradig reflektierend für die Laserwellenlänge λ_{las} . Anstelle dieser longitudinal eingestrahnten Pumpstrahlung ist auch transversales Pumpen, d. h. seitliche Einstrahlung in den Kristall, möglich. Auf das in einem Halter gelagerte photoelastische Material wirkt die Eingangsgröße Kraft F und induziert in dem Material 101 eine mechanische Spannungsverteilung, die eine veränderte Phasendifferenz in dem Material erzeugt. Die Frequenzänderung ΔFSR eines phasenanisotropen Resonators zwischen den Resonanzstellen v_1 , v_2 einer Resonanzordnung wird durch den Gesamtanisotropiegrad A (Holzapfel, W.; Settgast, W.; Technisches Messen tm 57 (1990) 9, Seite 323–334) gekennzeichnet, der sich aus den Polarisationssebenen zugeordneten Anisotropiegraden A_1 und A_2 zu $A = A_2 - A_1$ berechnet. Es gilt

$$\Delta\text{FSR} = \text{FSR} \cdot A \quad (1)$$

mit $\text{FSR} = c/2L_{\text{res}}$: Freier Spektralbereich des Resonators,
 c : Lichtgeschwindigkeit,
 $L_{\text{res}} = n \cdot L_{\text{res}}$: optische Resonatorlänge,
 n : optische Brechzahl.

Wirkt die Kraft F bei paralleler Ausrichtung zwischen Kraft und einer durch die Restphasenanisotropie vorgegebenen Polarisationssebenen auf das photoelastische Material 101 des Durchmessers D ein, dann ändern sich die Anisotropiegrade A_1 und A_2 und zwar

$$\begin{aligned} A_1 &= -G \cdot (C_0/\lambda_{\text{las}} \cdot D) \cdot F \\ A_2 &= G \cdot (C_0/\lambda_{\text{las}} \cdot D) \cdot F \end{aligned} \quad (2)$$

mit C_0 : photoelastischer Koeffizient des Materials,
 λ_{las} : Wellenlänge des Lasers,
 G : Geometriefaktor des Aufnahmerelementes.

Für die Frequenzänderung ΔFSR gilt dann die eine lineare Abhängigkeit

$$\Delta\text{FSR} = 2 \cdot \text{FSR} \cdot G \cdot (C_0/\lambda_{\text{las}} \cdot D) \cdot F \quad (3)$$

Wird das photoelastische Kristallmaterial, welches erfindungsgemäß gleichzeitig laseraktive Eigenschaften aufweist, z. B. Nd:YAG-Kristalle, durch eine geeignete Strahlungsquelle 102 und Einkopplung 103 optisch gepumpt, so wird aus dem passiven phasenanisotropen Resonator ein aktiver Laser, der die optischen Frequenzen v_1 und v_2 emittiert. Dieser Laser enthält somit nur ein Bauteil, welches die Funktion des verstärkenden Mediums für den Laser und die des Sensormaterials erfüllt.

Die Differenz zwischen den beiden ausgekoppelten optischen Frequenzen muß elektronisch gemessen werden, um ein kraftproportionales Signal zu erhalten. Die Messung kann mit einer optischen Überlagerungsein-

richtung und den üblichen Auswertverfahren erfolgen, d. h. Abbildung der Strahlung auf eine gemeinsame Schwingungsebene mit einem Polarisator und anschließende Überlagerung der Strahlungsanteile auf einer Photodiode zur Bildung der Mischfrequenz, die mit einem elektronischen Zähler oder einem elektronischen Spektrumanalysator gemessen wird.

Durch die Verwendung eines photoelastischen und gleichzeitig laseraktiven Materials mit kristalliner Struktur (z. B. Nd:YAG) werden in geschickter Weise folgende Vorteile kombiniert:

- 1) Bei der photoelastischen Wandlung der Kraft in die Frequenz treten keine störenden Kriech- und Hystereseeffekte auf, weil durch die Gitterstruktur des kristallinen Wandlmaterials im Gegensatz zu Gläsern keine Beweglichkeit der Atome unter Krafteinfluß möglich ist.
- 2) Die optische Linienbreite des Laserlichtes ist bei gleicher Dotierung für kristallines Wirtsmaterial (z. B. neodymdotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall: Nd:YAG) wesentlich schmäler als für isotropes Wirtsmaterial (z. B. neodymdotiertes Glas). Bei hinreichend hoher Stabilität der Laserwellen-Mittenfrequenz und hoher Meßempfindlichkeit (d. h. kurze Resonatorlänge) kann daher mit dem kristallinen Lasermaterial die untere Meßgrenze (Auflösung) deutlich verbessert werden.

Bei der Ausführung nach Fig. 1 bilden die Spiegel 104 und 105 und das photoelastische, laseraktive Material 101 einen monolithischen Sensor-Oszillator. Diese Ausführungsform bietet die Möglichkeit, sehr kompakte, störungsempfindliche kraftmessende optische Sensor-Oszillatoren herzustellen, da alle Grenzflächen im Resonator, die störende Auswirkungen erzeugen können, eliminiert sind. Eine hohe Meßempfindlichkeit wird erzielt, wenn bei der Dimensionierung des Sensor-Oszillators ein möglichst kurzer Resonator verwendet wird.

Ist eine definierte Offsetfrequenz notwendig, so kann diese mit einem resonatorinternen phasenanisotropen Element (Fig. 2, 206), wie z. B. einem $\lambda/8$ -, $\lambda/4$ -Element oder durch entsprechende optische Schichten auf einem der Resonatorspiegel, eingestellt werden.

Die Ausführung nach Fig. 3 verdeutlicht, wie eine vollständig fasergekoppelte Kraftmeßeinrichtung aufgebaut sein kann. Hier wird die Pumpstrahlung der Strahlungsquelle 301 falls notwendig mittels einer Optik 302 eingekoppelt in einer optischen Faser 303 geführt und in den Sensor-Oszillator eingespeist. Die vom Sensor-Oszillator (304, 305, 306) emittierte Strahlung wird ebenfalls vom Oszillator über eine Faser 308 zu der Auswerteeinheit 309 geführt. Damit ist es möglich, einen Sensor-Oszillator zu realisieren, der auch in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden kann. Die optoelektronischen Bauteile, wie Strahlungsquelle 301 und Auswerteeinheit 309, können abgesetzt vom Sensor-Oszillator in einer Einheit zusammengefaßt werden. In einer alternativen Realisierung können zur Versorgung mehrerer Sensor-Oszillatoren Leistungsteile in faseroptischer Ausführung verwendet werden.

Die Ausführung nach Fig. 4 vereinfacht die faseroptische Ankopplung dadurch, daß nur eine Faser 405 für die Zuführung der Pumpstrahlung zum Sensor-Oszillator 406, 407 und für die Fortleitung der Signalstrahlung verwendet wird. Die Trennung 403 der Signalstrahlungsanteile von denen der Pumpstrahlung erfolgt z. B. mit einem dichroitischen Strahlteiler oder über einen

wellenlängenabhängigen Faserkoppler. Die Verwendung nur einer Faser erleichtert die Möglichkeit, die Versorgungs- und Auswerteeinheit für mehrere Sensor-Oszillator-Module zu verwenden. Dafür wird die Ankopplung der Faser an den Sensor-Oszillator z. B. mit einem Faserstecker genügender Präzision durchgeführt, der keine weitere Justage benötigt. Somit ist eine einfache Anpassung des Meßbereiches und der Meßempfindlichkeit über einen Austausch des Sensor-Oszillators möglich.

Die Ausführung nach Fig. 5 erlaubt über die vorgesehene Regeleinrichtung (502 bis 506) die Art der Frequenzverstimmung der beiden optischen Frequenzen v_1 , v_2 zu verändern. Je nach Einstellung der Regelschaltung erfolgt bei einer Krafteinwirkung die Variation der Frequenz symmetrisch oder asymmetrisch zur Ausgangsabstimmung der Signalanteile. So wird gewährleistet, daß bis zur maximalen Krafteinwirkung die optischen Moden innerhalb der laserfähigen Bandbreite bleiben und so die obere Meßgrenze maximal ausgenutzt wird. Mit einer Regeleinrichtung ist eine aktive Kompensation der polarisationsunabhängigen Störungen möglich, so daß eine Verbesserung der Auflösung durch höhere Laserstabilität gegeben ist.

Patentansprüche

1. Hochempfindliche optische Kraftmeßeinrichtung mit frequenzanalogem, elektrischem Ausgangssignal, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Kraftmeßeinrichtung aus einem nach den Unteransprüchen 1—4 gekennzeichneten kraftgesteuerten optischen Sensor-Oszillator und gegebenenfalls aus einer nach dem Unteranspruch 5 gekennzeichneten Stabilisierung besteht.

2. Optischer Sensor-Oszillator der hochempfindlichen optischen Kraftmeßeinrichtung mit frequenzanalogem Ausgangssignal, dadurch gekennzeichnet, daß das mit einem starren, kräfteausleitenden Gestell (100) verbundene Sensorelement (101) aus einem laserfähigen Kristall (geometrische Länge L) mit photoelastischen Eigenschaften besteht, welcher mittels der Strahlungsquelle (102) auf der Wellenlänge λ_{pump} , die auf die laseraktiven Eigenschaften des Materials abgestimmt ist und über die Optik (103) in das Sensorelement (101) einkoppelt, optisch gepumpt wird, und an seinen Enden beide Resonatorspiegel (104 und 105) trägt und so einen vollmonolithischen optischen Sensor-Oszillator der geometrischen Länge $L_{\text{Res}} = L$ bildet, auf den als Eingangsgröße die Kraft F in orthogonaler Richtung zur Resonatorachse einwirkt und die ausgekoppelten orthogonal polarisierten Strahlungsanteile der Wellenlänge λ_{Laser} hinsichtlich ihrer Frequenzen v_1 und v_2 verändert, so daß durch die optische Überlagerungseinrichtung (106) ein frequenzanaloges elektrisches Ausgangssignal mit der Frequenz $f = |v_2 - v_1|$ entsteht, welches von der Kraft F abhängt.

3. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor-Oszillator aus zwei zueinander ausgerichteten separaten Resonatorspiegeln (203 und 205), einem separaten optischen Sensorelement (204) mit photoelastischen und laseraktiven Eigenschaften oder aus einem separaten Resonatorspiegel (203 oder 205), einem separaten Sensorelement (204) mit photoelastischen und laseraktiven Eigenschaften,

welches den zweiten Resonatorspiegel (203 oder 205) trägt und ggf. noch weiteren separaten resonatorinternen Bauteilen (206), die eine Phasenanisotropie zur Grundaufspaltung der Resonanzfrequenzen v_1 und v_2 erzeugen, sowie einer externen Strahlungsquelle (201), die auf die laseraktiven Eigenschaften des Materials abgestimmt ist und deren Strahlung λ_{pump} über eine Einkoppeloptik (202) dem optischen Material (204) zugeführt wird, besteht und dieser Sensor-Oszillator seine orthogonal polarisierten Strahlungskomponenten auf der Wellenlänge λ_{Laser} mit den Frequenzen v_1 und v_2 , die von der Kraft F abhängen, abstrahlt und mittels der optischen Überlagerungseinrichtung (207) das elektrische Ausgangssignal mit der kraftabhängigen Frequenz f gebildet wird.

4. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Leistung, die durch die Pumpquelle (301) zur Anregung der Lasertätigkeit erzeugt wird, über eine Einkoppeloptik (302) und eine Lichtleitfaser (303) zugeführt wird und daß die aus dem Auskoppelresonatorspiegel austretende Laserstrahlung mit den Frequenzen v_1 , v_2 des Sensor-Oszillators (305) mit Resonatorspiegeln (304, 306) mittels einer Optik (307) in eine optische Lichtleitfaser (308) eingekoppelt wird und über diese Faser zu der optischen Überlagerungseinrichtung (309) geleitet wird, so daß ein elektrisches Frequenzsignal f erzeugt wird, welches proportional zu der einwirkenden Kraft F ist.

5. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die optische Leistung, die durch die Strahlungsquelle (401) zur Anregung der Lasertätigkeit erzeugt wird, über eine Einkoppeloptik (402), einen wellenlängenabhängigen Strahlteiler (403), eine Anpassungsoptik (404), eine Lichtleitfaser (405) und eine bidirektionale Kollimationsoptik (406) dem Sensor-Oszillator (407) zugeführt wird und daß die aus dem Auskoppelresonatorspiegel austretende Laserstrahlung mit den Frequenzen v_1 , v_2 mit der Optik (406) wieder in die optische Lichtleitfaser (405) eingekoppelt wird und über diese Faser und den wellenlängenabhängigen Strahlteiler (403) zu der optischen Überlagerungseinrichtung (408) geleitet wird, so daß aus der Überlagerung optischer Signalanteile ein Frequenzsignal erzeugt wird, welches proportional zu der einwirkenden Kraft F ist.

6. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß ein Teil der ausgekoppelten Signalstrahlung des Sensoroszillators (501) mit den Frequenzanteilen v_1 und v_2 mittels eines Strahlteilers (502) in orthogonal polarisierte Strahlungskomponenten aufgeteilt wird und daß die orthogonal polarisierten Strahlungsanteile über optische Photodetektoren (503, 504) mit nachfolgender elektronischer Regelschaltung (505) und elektromechanischem oder elektrooptischem Stellglied (506) dazu verwendet werden, um die optischen Frequenzen v_1 und v_2 der zur Kraftmessung verwendeten Signalanteile innerhalb der laserfähigen Bandbreite zu stabilisieren, und daß ein anderer Teil der optischen Strahlung mit den Frequenzanteilen v_1 und v_2 in einer opto-elektronischen Einheit (507) zu dem kraftabhängigen Frequenzsignal $f = v_2 - v_1$ ausge-

Fig. 1

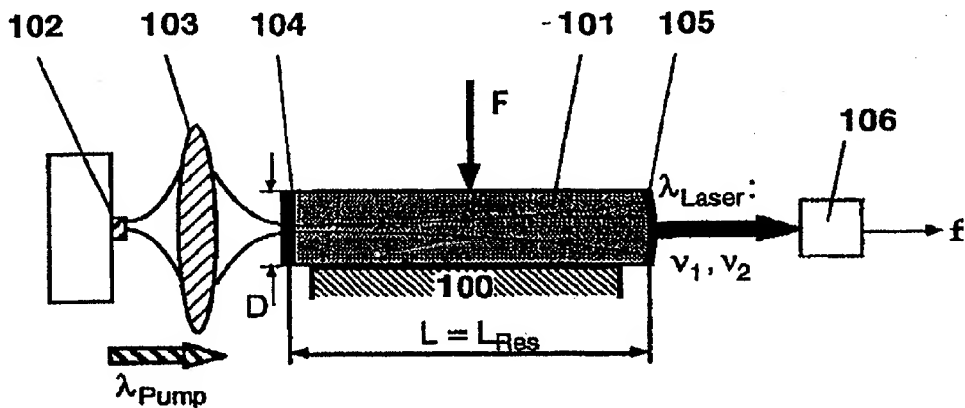


Fig. 2

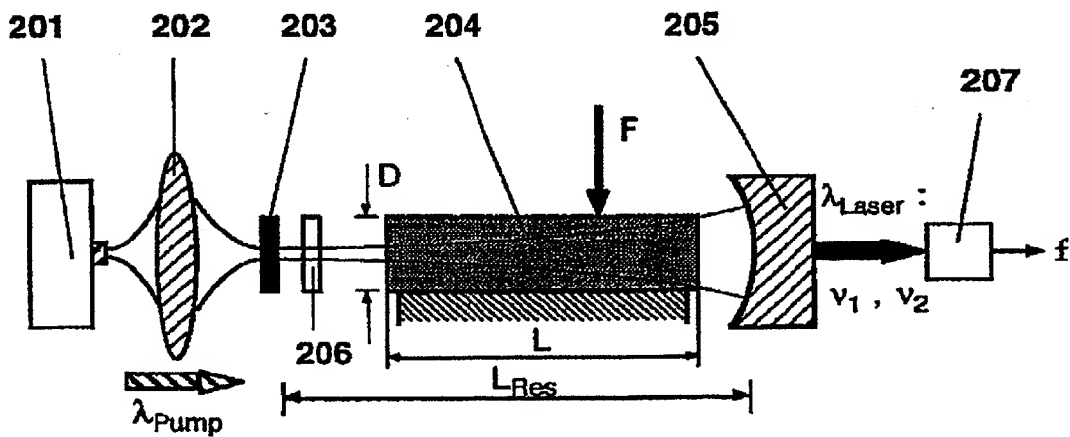


Fig. 3

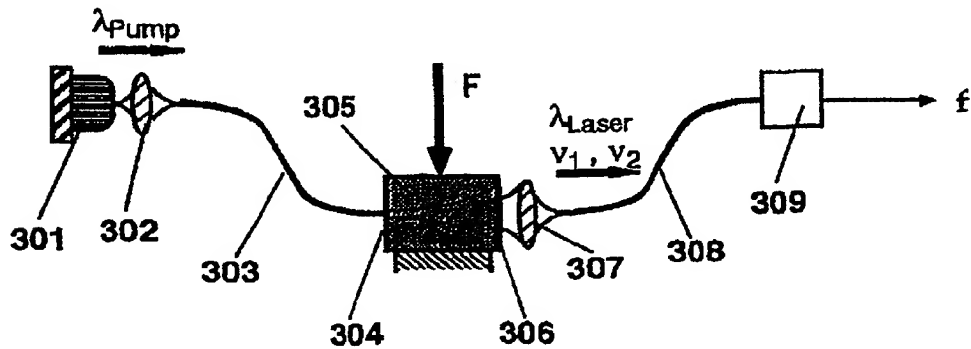


Fig. 4

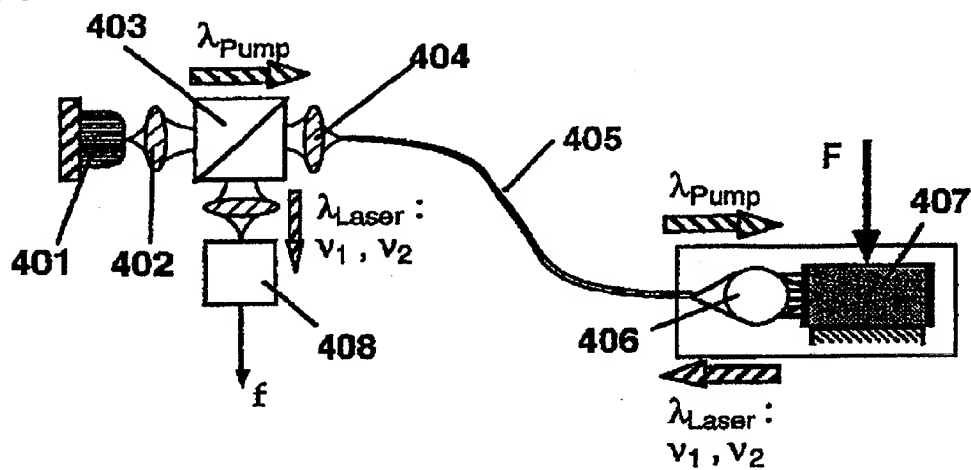


Fig. 5

